

**Martin KREJSA<sup>1</sup>, Vladimír TOMICA**

## STANOVENÍ SYSTÉMU PROHLÍDEK KONSTRUKCÍ NAMÁHANÝCH NA ÚNAVU

### DETERMINATION OF STRUCTURES INSPECTION SUBJECTED TO FATIGUE

#### Abstrakt

V příspěvku je detailně zpracovaná a na příkladu demonstrováná metodika pravděpodobnostního posouzení ocelové konstrukce namáhané únavou s ohledem na vznik únavových trhlin z okraje a povrchu, která vede k návrhu systému prohlídek konstrukce. K řešení je využita nově vyvíjená metoda Přímého Optimalizovaného Pravděpodobnostního Výpočtu – POPV.

#### Klíčová slova

Přímý Optimalizovaný Pravděpodobnostní Výpočet, POPV, programový systém ProbCalc, únavová trhlina, lineární lomová mechanika, přípustný rozměr, měřitelný rozměr, iniciační rozměr, šíření z okraje, šíření z povrchu, podmíněná pravděpodobnost, prohlídka konstrukce.

#### Abstract

Paper describes in detail and gives example of the probabilistic assessment of a steel construction subject to fatigue load, particular attention being paid to cracks from the edge and those from surface. This information is used as a basis for proposing a system of inspections. The newly developed method Direct Optimized Probabilistic Calculation (DOProC) is used for solution.

#### Keywords

Direct Optimized Probabilistic Calculation, DOProC, software package ProbCalc, fatigue crack, linear fracture mechanics, acceptable size, detectable size, initial size, fatigue crack propagation from the edge, fatigue crack propagation from surface, conditional probability, inspection of structure.

## 1 ÚVOD

Metodou Přímého Optimalizovaného Pravděpodobnostního Výpočtu - POPV, jejíž podstata spočívá v numerické integraci konvolutorního integrálu bez aplikace některé ze simulačních technik, lze v současnosti efektivně řešit řadu pravděpodobnostních úloh [8]. Jednou z oblastí, kde byla metodika POPV s úspěchem aplikovaná, je i problematika šíření únavových trhlin cyklicky namáhaných konstrukcí [13]. Následující příspěvek obsahuje detailně zpracovanou a na příkladech (detail náchylný na únavové poškození z [4]) demonstrovanou metodiku pravděpodobnostního posouzení konstrukce namáhané únavou s ohledem na vznik únavových trhlin z okraje i povrchu s ohledem na překročení meze pevnosti základního materiálu, která vede k návrhu systému prohlídek konstrukce.

Na základě pravděpodobnostního výpočtu metodou POPV lze u ocelových konstrukcí a mostů namáhaných únavou stanovit pravděpodobnosti pro základní jevy, související s růstem únavové trhliny, které mohou nastat v libovolném čase  $t$  životnosti konstrukce. Tyto pravděpodobnosti určené

---

<sup>1</sup> Doc. Ing. Martin Krejsa, CSc., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 303, e-mail: martin.krejsa@vsb.cz.

na základě analýzy funkce spolehlivosti pro každý rok provozu konstrukce jsou výchozím podkladem pro stanovení času prohlídek cyklicky namáhané ocelové konstrukce nebo mostu s využitím podmíněné pravděpodobnosti.

## 2 PROBLEMATIKA ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY

Spolehlivost nosné konstrukce, namáhané proměnným zatížením, je výrazně ovlivněna deformačními účinky, způsobenými zejména únavou základního materiálu. V procesu návrhu těchto konstrukcí se vychází z koncepce tzv. Wöhlerových křivek [1, 2], u nichž se připouští omezená životnost do porušení, stanoveného na základě konstantního rozkmitu a předpokládaného množství zatěžovacích cyklů. Problém únavového poškození stavebních ocelových konstrukcí a mostů je řešen dlouhodobě.

Rozvíjejí se metody uvažující s podchycením možných vad a defektů ve formě inicializačních trhlin, které výrazně urychlují šíření únavových trhlin. Jednou z alternativ je lineární lomová mechanika, jež je předmětem zkoumání již řadu let zejména ve strojírenských oborech a do problematiky návrhu nosných stavebních konstrukcí je postupně přebírána a upravována.

Pro podchycení šíření únavových trhlin jsou důležité tři jejich rozměry. Prvním je *iniciační (počáteční) rozměr trhliny*, který představuje nahodilou závadu na prvku namáhaném proměnnými účinky zatížení. Existenci iniciační trhliny ve stádiu šíření, mají podchytit prohlídky a to při *měřitelné délce trhliny*. Třetím významným rozměrem je doposud označovaný kritický rozměr, jenž je konečným zaznamenaným rozměrem před porušením formou křehkého lomu. Největší konečný rozměr je vhodné stanovit jiným způsobem. Stavební konstrukce a mosty se navrhují na extrémní účinky zatížení. Únavové účinky se ověřují pouze na detailech náchylných na únavová poškození od proměnných účinků zatížení provozního. Pokud by byl nosný prvek navržen s příslušnou rezervou spolehlivosti návrhu přesně na účinky extrémního zatížení, pak oslabení trhlinou negativně ovlivní jeho návrhový stav.

Poškození únavovou trhlinou je závislé na počtech cyklů rozkmitu napětí, což představuje časový faktor po celou návrhovou životnost. Předpokládá se, že poruchovost narůstá s časem a spolehlivost tedy klesá. Zahrne-li se do poruchovosti i možné šíření únavové trhliny, pak je ho potřebné sledovat a ohraničit největším přípustným oslabením. Toto oslabení je odvozeno od přípustného rozměru únavové trhliny, jenž v sobě zahrnuje bezpečnostní požadavky na dosažení kritické trhliny, která může být odvozená od křehkého lomu, ale pro ocelové konstrukce významněji od lomu houževnatého. Příčinou tohoto typu degradace nosného prvku v čase je nahodilá existence iniciační trhliny a její růst vlivem proměnných účinků zatížení. Následkem je oslabení prvku navrženého na účinky extrémního zatížení, v průběhu stabilního narůstání trhliny až po přípustný rozměr, který v čase jeho dosažení je limitním pro zachování požadované spolehlivosti.

Potřebné použití pravděpodobnostních přístupů pro sledování rychlosti růstu únavové trhliny po její *přípustný rozměr* vyplývá z nejistot ve stanovení vstupních proměnných veličin a nutnosti sledování hladiny spolehlivosti [6]. Rozhodujícími vstupy u rozměrů trhliny jsou její iniciační rozměr a přípustný rozměr. Definování přípustného rozměru  $\text{index}$  je podmínkou nutnou, ne však postačující, protože dominantní pro růst trhliny je stanovení iniciačního rozměru.

Následující výklad je zaměřen na objasnění a konkretizování některých normových požadavků, umožňujících dosáhnout požadované spolehlivosti při použití metody přípustných poškození. Uvádí metodiku pro sledování šíření trhliny po rozměr, který je zpřesněným přípustným rozměrem pro reálné konstrukční detaily uváděné už např. [3], ale v podmínkách deterministického pojetí.

## 3 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ PROBLEMATICE

Problematika je sledovaná ve dvou vzájemně se ovlivňujících částech: pravděpodobnostním řešením šíření únavové trhliny a nejistotách při stanovení veličin vstupujících do výpočtu.

Únavová trhlina, oslabující konstrukční prvek o určitou plochu, je při sledování růstu popisovaná jen jedním celkovým rozměrem  $a$ . Pro popis růstu trhliny se nejčastěji používá metoda lineárně pružné lomové mechaniky [5], která definuje vztah mezi rychlostí šíření trhliny  $\frac{da}{dN}$  a rozkmitem koeficientu intenzity napětí  $\Delta K$  v čele trhliny Paris-Erdoganovou rovnicí (např.[21]):

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

kde  $C$  a  $m$  jsou materiálové konstanty,  $a$  je rozměr (délka) trhliny a  $N$  je počet zatěžovacích cyklů. Předpokladem pro stabilní šíření únavové trhliny je existence iniciační trhliny  $a_0$  v místě koncentrace napětí, které se může nacházet na okraji nebo na povrchu prvku.

Při výchozím předpokladu, že prvotní je návrh konstrukce na účinky extrémního zatížení s následným posudkem únavové odolnosti, pak je rezerva spolehlivosti v inženýrské pravděpodobnostní metodě vyjádřená ve tvaru:

$$g(R, S) = G = R - S, \quad (2)$$

kde  $R$  je náhodně proměnná odolnost prvku a  $S$  představuje náhodně proměnné účinky extrémního zatížení. V případě, že na takto navržený prvek působí provozní zatížení, mohou nastat následující případy:

- a) **bezpečná životnost** - únavové účinky nedegradují prvek únavovou trhlinou;
- b) **přípustná poruchovost** - únavové účinky degradují prvek a snižují jeho únosnost;
- c) **přípustná poruchovost** - únavové účinky vyjádřené změnami napětí.

Ve výpočtovém modelu šíření únavové trhliny je sledováno napětí, přičemž při vzniku největší přípustné trhliny je odolnost konstrukce  $R$  reprezentována napětím na mezi kluzu  $f_y$ , která je neměnná. Tento názornější přístup c) byl upřednostněn před přístupem b), jelikož vyjadřuje nelineární nárůst obou napětí na oslabovaném prvku.

Podmínka pro stanovení přípustné délky trhliny  $a_{ac}$  se s použitím (1) vyjádří:

$$N = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_{ac}} \frac{da}{\Delta K^m} > N_{tot}, \quad (3)$$

kde  $N$  je počet cyklů pro zvětšení trhliny z iniciační  $a_0$  do přípustné  $a_{ac}$ ;  $N_{tot}$  je počet cyklů za dobu celé životnosti. Vztah (3) je nepoužitelný, neboť iniciační rozměr trhliny není znám.

Vztah pro rychlost šíření únavové trhliny (1) se musí pro sledovaný účel upravit. Rozkmit koeficientu intenzity napětí  $\Delta K$  lze při známém rozkmitu špiček napětí  $\Delta \sigma$  vyjádřit vztahem:

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F_{(a)}, \quad (4)$$

kde  $F_{(a)}$  je tzv. kalibrační funkce, která sleduje průběh šíření trhliny, jež se při změně počtu cyklů z  $N_1$  na  $N_2$  rozšíří z délky  $a_1$  na  $a_2$ . Úpravou (1) s využitím (4) lze pak získat upravený vztah:

$$\int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{\left(\sqrt{\pi \cdot a} \cdot F_{(a)}\right)^m} = \int_{N_1}^{N_2} C \cdot \Delta \sigma^m \cdot dN. \quad (5)$$

Pokud se délka trhliny  $a_1$  rovná počáteční velikosti trhliny  $a_0$  (předpokládaný rozměr iniciační trhliny v pravděpodobnostním pojetí), a  $a_2$  naopak konečné - přípustné délce trhliny  $a_{ac}$  (rozměr přípustné trhliny, nahrazující rozměr kritický  $a_{cr}$  v případě, kdy trhlina končí křehkým lomem), levou stranu rovnice (5) lze pak považovat za náhodně proměnnou odolnost konstrukce  $R$ :

$$R_{(a_{ac})} = \int_{a_0}^{a_{ac}} \frac{da}{\left(\sqrt{\pi \cdot a} \cdot F_{(a)}\right)^m}. \quad (6)$$

Obdobně lze definovat akumulaci účinků zatížení (náhodně proměnné účinky extrémního zatížení), která se rovná pravé straně (5):

$$S = \int_{N_0}^N C \Delta \sigma^m \cdot dN = C \Delta \sigma^m (N - N_0) , \quad (7)$$

kde  $N$  je celkový počet rozkmitů špiček napětí  $\Delta \sigma$  při nárůstu velikosti trhliny z  $a_0$  na  $a_{ac}$ ,  $N_0$  představuje počet rozkmitů v čase inicializace únavové trhliny (většinou je roven nule).

Lze definovat funkci spolehlivosti  $G_{fail}$ , jejíž analýzou je možno získat pravděpodobnost poruchy  $p_f$ :

$$G_{fail}(Z) = R_{(a_{ac})} - S , \quad (8)$$

kde  $Z$  je vektor náhodných fyzikálních vlastností - mechanických vlastností materiálu, geometrie konstrukce, účinků zatížení a také rozměrů únavové trhliny.

Pravděpodobnost poruchy  $p_f$  je pak rovna:

$$P_f = P(G_{fail}(Z) < 0) = P(R_{(a_{ac})} - S < 0) . \quad (9)$$

#### 4 STANOVENÍ ČASU PROHLÍDEK S VYUŽITÍM PODMÍNĚNÉ PRAVDĚPODOBNOSTI

Vzhledem k nejistotě, která souvisí s předpokládaným rozměrem iniciační trhliny v pravděpodobnostním výpočtu, příp. zda iniciační trhlina vůbec existuje, a dalším nepřesnostem, které vstupují do pravděpodobnostního výpočtu sledování růstu únavové trhliny, je významná cílená, časově stanovená kontrola velikosti už zaměřitelné trhliny. Rozměr přípustné trhliny ovlivňuje stanovení času prohlídky konstrukce. Analýza výsledků prohlídky konstrukce pak při nezjištění únavových trhlín vede k podmíněné pravděpodobnosti jejich vzniku (např. [22, 25]).

S růstem únavové trhliny lze definovat náhodné jevy, které mohou nastat v libovolném čase „ $t$ “ během životnosti konstrukce:

- **Jev  $U(t)$ :** V čase „ $t$ “ nebyla zjištěna žádná únavová trhlina, takže velikost únavové trhliny  $a(t)$  ještě nedosáhla měřitelnou velikost  $a_d$  (detectable), takže platí:

$$a(t) < a_d , \quad (10)$$

- **Jev  $D(t)$ :** V čase „ $t$ “ byla zjištěna únavová trhlina, jejíž velikost  $a(t)$  ale zatím nedosáhla přípustnou velikost  $a_{ac}$ , takže platí:

$$a_d \leq a(t) < a_{ac} , \quad (11)$$

- **Jev  $F(t)$ :** V čase „ $t$ “ byla zjištěna porucha, neboť velikost únavové trhliny  $a(t)$  dosáhla přípustnou velikost  $a_{ac}$ , takže platí:

$$a(t) \geq a_{ac} . \quad (12)$$

Nezjištění trhliny v čase „ $t$ “ může znamenat i případ, že v sledovaném konstrukčním prvku se nešíří žádná únavová trhlina, resp. se jedná o počáteční stadium nukleace (vznik trhliny v materiálu) únavové trhliny, s čímž lomová mechanika neuvažuje. V případě nezjištění únavové trhliny lze předpokládat, že trhlina se v daném prvku ve skutečnosti vyskytuje, avšak její velikost je natolik malá, že ji není možné za daných podmínek zjistit.

Na základě výše definovaných jevů je možno určit v libovolném čase „ $t$ “ i jejich pravděpodobnosti vzniku. Všechny tři jevy tvoří úplný prostor jevů, které mohou nastat v čase „ $t$ “, a platí tedy:

$$P(U(t)) + P(D(t)) + P(F(t)) = 1 . \quad (13)$$

Pravděpodobnostní výpočet probíhá ve zvolených časových krocích, přičemž jeden časový krok se rovná obvykle jednomu roku životnosti konstrukce. V okamžiku, kdy pravděpodobnost poruchy  $P(F(t))$  dosáhne předepsanou návrhovou hodnotu  $p_d$ , je navržena prohlídka konstrukce, která je zaměřena na zjištění únavové trhliny v příslušném konstrukčním prvku. Výsledek prohlídky poskytuje informaci o skutečném stavu konstrukce, který může být zakomponován do dalšího pravděpodobnostního výpočtu. Výsledkem prohlídky v čase „ $t$ “ tedy může být jeden ze tří uvedených jevů. Na základě výsledné prohlídky v čase „ $t$ “ je možno vyjádřit pravděpodobnost vzniku těchto jevů v čase  $T > t_1$  s využitím věty o podmíněné pravděpodobnosti.

Pro stanovení doby následující prohlídky je podstatné určit podmíněné pravděpodobnosti  $P(F(T)|U(t_1))$ , resp.  $P(F(T)|D(t_1))$ , které lze s využitím věty o úplné pravděpodobnosti (např. [25]) vyjádřit:

$$P(F(T)|U(t_1)) = \frac{P(F(T)) - P(F(t_1)) - P(D(t_1)) \cdot P(F(T)|D(t_1))}{P(U(t_1))}, \quad (14)$$

$$P(F(T)|D(t_1)) = \frac{P(F(T)) - P(F(t_1)) - P(U(t_1)) \cdot P(F(T)|U(t_1))}{P(D(t_1))}. \quad (15)$$

Pokud není brána v úvahu možná redistribuce napětí z místa oslabeného trhlinou, je v praktických případech rychlost nárůstu trhliny v rozsahu měřitelných hodnot obvykle již poměrně vysoká. V případě nalezení únavové trhliny během prohlídky konstrukce se zvolí buď sledování bezpečného růstu trhliny, nebo zásah, který další růst únavové trhliny zpomalí nebo zastaví. Pro potřeby efektivního načasování termínů následujících prohlídek má největší význam vztah (14), který určuje pravděpodobnost poruchy v čase  $T > t_1$  za předpokladu, že během poslední prohlídky nebyla na sledovaném místě nalezena únavová trhlina. Z tohoto vztahu je zřejmé, jaký vliv na výsledek pravděpodobnostního výpočtu mají vzájemné poměry mezi třemi uvažovanými velikostmi trhliny - iniciační (počáteční), měřitelnou a přípustnou.

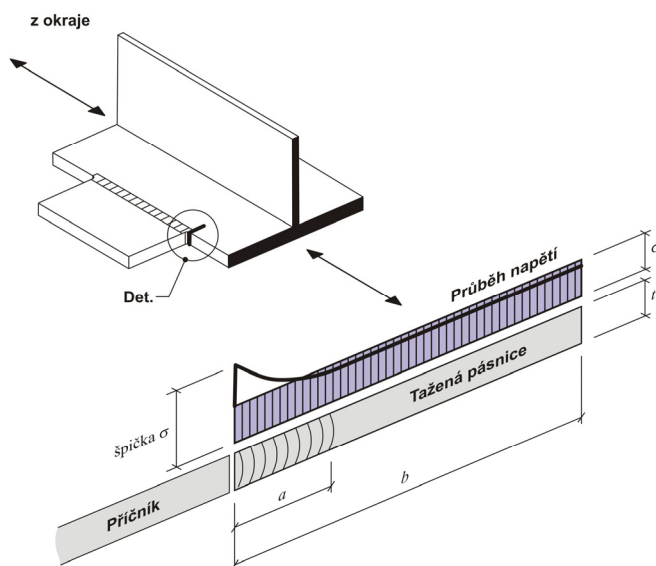
Pravděpodobnosti v rovnici (14) lze vyčíslit v libovolném čase  $T > t_1$  např. s využitím dostupného softwaru [7, 9] metodou POPV [14, 15, 23, 24] nebo metodou Monte Carlo (srovnání výsledků dosažených oběma metodami s poněkud odlišnými vstupními parametry bylo provedeno např. v [25]). Pokud pravděpodobnost poruchy  $P(F(t)|U(t_1))$  dosáhne předepsanou návrhovou hodnotu  $p_d$ , je navržena další prohlídka, zaměřená na zjištění únavové trhliny v příslušném konstrukčním prvku. Výsledkem prohlídky může být opět jeden ze tří uvedených jevů s odpovídající pravděpodobností. Celý výpočet lze tímto způsobem opakovat za účelem správného načasování dalších prohlídek konstrukce.

## 5 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ VÝPOČET ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY

Nejčastější oblastí vzniku únavové trhliny je mostovka železničních nebo silničních mostů. Závažným podnětem pro vznik únavové trhliny je skutečnost, že jeden cyklus zatížení představuje každá kolová síla (např. [20]). Navíc je účinek zatížení výraznější v případě velmi blízkého uložení konstrukčního prvku k působišti zatížení.

Významným faktorem, který se na vzniku únavové trhliny podílí, je způsob provedení svaru, spojený se vznikem vlastních pnutí i iniciační trhliny vlivem nekvalitního opracování. V místech náhlé změny průřezu (obr. 1) se mohou na únavovém poškození podílet i rozdíly v průběhu napětí reálného, které vykazuje špičky v místě svaru, a napětím uvažovaného v návrhu (rovnoměrné napětí v pásnici).

Podle polohy iniciační trhliny je možné šíření trhliny sledovat z okraje [19] nebo povrchu [16, 17, 18]. Tyto případy jsou co do četnosti, významu i koncentrace napětí nejvýznamnější lokalitou nebezpečí vzniku únavového poškození na ocelových konstrukcích a mostech. Oba případy se odlišují vytvářením oslabující plochy při šíření trhliny a kalibrační funkcí  $F_{(a)}$ , která ve výpočtu ovlivňuje únavovou odolnost konstrukce.



Obr. 1: Detail mostní konstrukce, který je náchylný na únavové poškození  
V případě únavové trhliny z okraje je přípustný rozměr trhliny  $a_{ac}$  dán vztahem:

$$a_{ac} = b \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{f_y} \right). \quad (16)$$

Přímé explicitní vyjádření přípustné velikosti trhliny z povrchu  $a_{ac}$  je obtížné [10, 11] a je založeno na numerickém iteračním výpočtu vztahu:

$$\frac{1}{2} \pi a_{ac} \left( \frac{0,3027}{t} \cdot a_{ac}^2 + 1,0202 \cdot a_{ac} + 0,00699 \cdot t \right) - b \cdot t \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{f_y} \right) = 0 \quad (17)$$

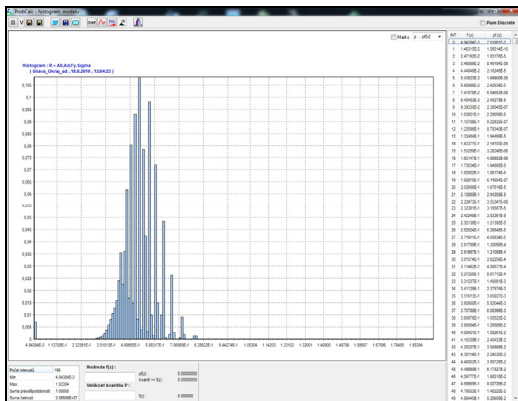
Pro pravděpodobnostní výpočet únavové odolnosti konstrukce s uvažováním vzniku únavových trhlin z okraje i povrchu byla využita metoda POPV. Řešení spočívá nejprve v určení odolnosti konstrukce  $R(a_d)$  a  $R(a_{ac})$  s využitím levé strany rovnice (6) s příslušnou hodnotou horní meze integrálu  $a_2$  a vztahů (16) a (17). V případě šíření únavové trhliny z okraje lze výsledný histogram odolnosti konstrukce  $R(a_d)$  a  $R(a_{ac})$  zobrazit na obr. 2 a 3.

Další z veličin, určující spolehlivost konstrukce, je účinek zatížení  $S$  z rovnice (7). Při jeho určení vstupuje do výpočtu deterministicky zadaná hodnota materiálových charakteristik  $C$  a  $m$  a dvojice veličin s parametricky zadaným rozdělením pravděpodobnosti - rozkmit špiček napětí  $\Delta\sigma$  [MPa] a celkový počet rozkmitů špiček napětí  $N$ . Tato veličina se určuje pro každý rok provozu konstrukce. Histogram akumulace účinku zatížení  $S$  se zadanou hodnotou počtu rozkmitů špiček napětí za 54 let provozu je zobrazen na obr. 4.

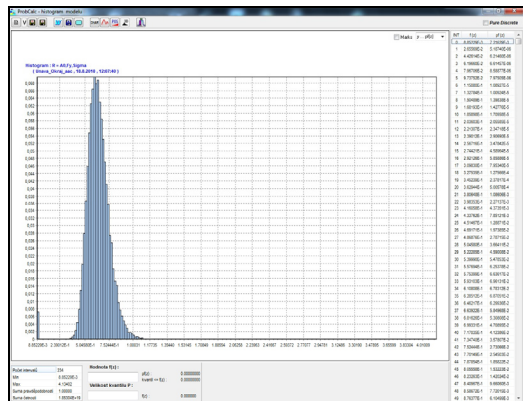
Pomocí (9) je pak stanovena pravděpodobnost poruchy  $P_f$  pro každý rok provozu konstrukce. Při šíření únavové trhliny z okraje lze výsledný histogram funkce spolehlivosti např. pro 54. rok provozu mostu zobrazit na obr. 5 (pravděpodobnost poruchy  $P_f = P(G_{fail} < 0) = 7,76732 \cdot 10^{-2}$ ).

Na základě vypočtené pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  a zadání požadované spolehlivosti  $P_d$  pak lze stanovit i dobu první prohlídky na mostě. Na obr. 6 a 7 jsou zobrazeny grafy závislosti pravděpodobnosti poruchy  $p_f$  na letech provozu konstrukce pro oba typy únavového poškození. Požadovaná spolehlivost byla vyjádřena v současnosti v inženýrské praxi používaným indexem spolehlivosti  $\beta = 2$ , což přibližně odpovídá návrhové pravděpodobnosti poruchovosti  $p_d = 0,02277$ .

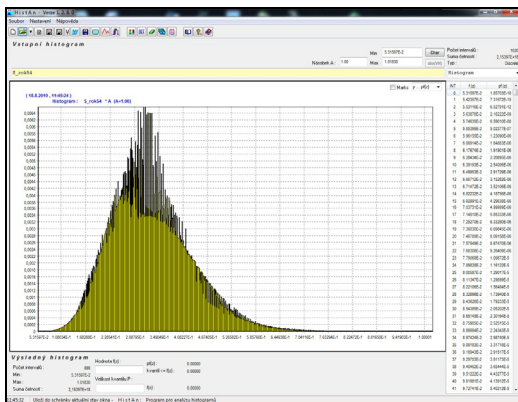




Obr. 2: Histogram odolnosti konstrukce  $R(a_d)$



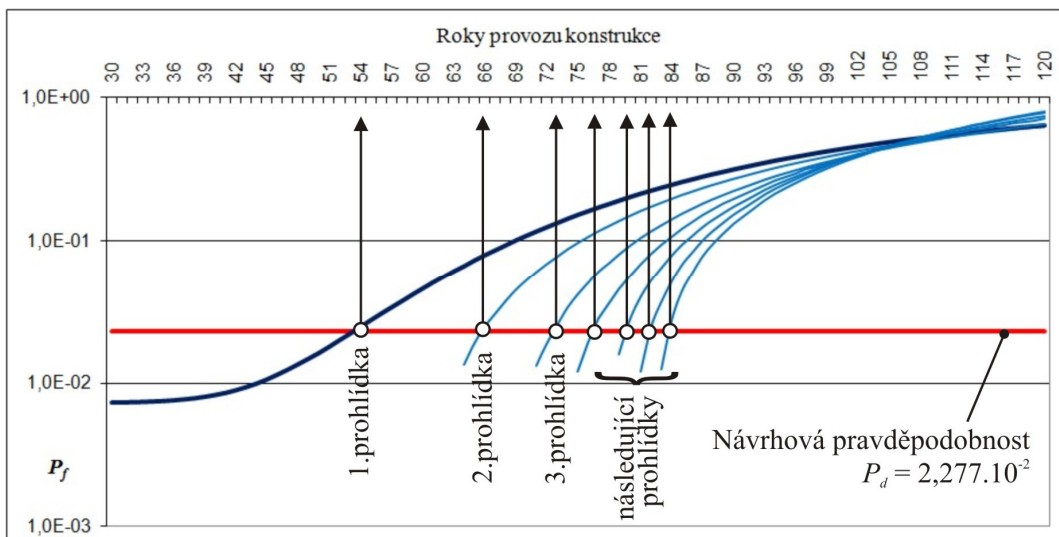
Obr. 3: Histogram odolnosti konstrukce  $R(a_{ac})$



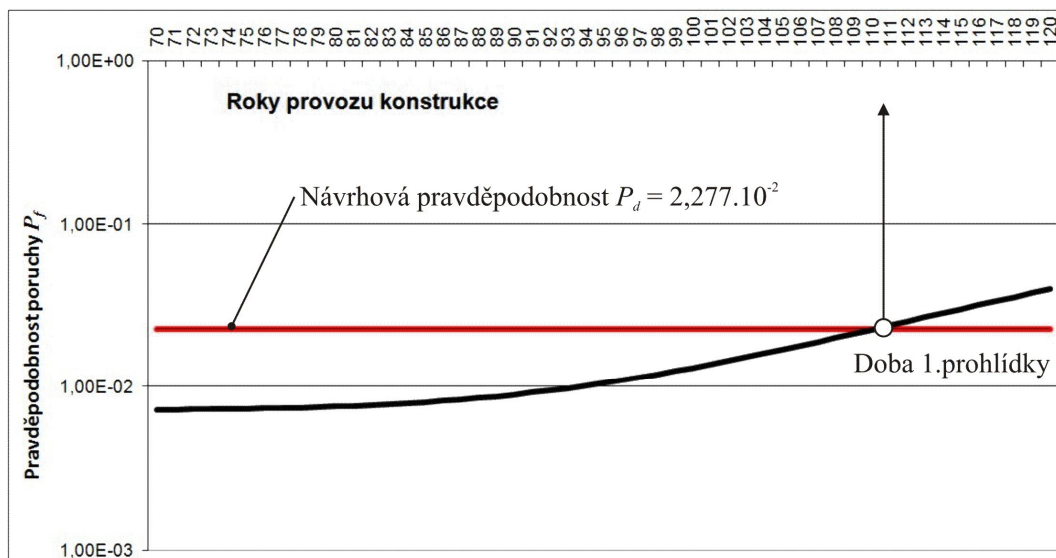
Obr. 4: Histogram akumulace účinku zatížení  $S$  pro celkový počet rozkmitů špiček napětí za 54 let



Obr. 5: Histogram funkce spolehlivosti  $G_{fail}$  po 54 letech provozu mostu – šíření z okraje



Obr. 6: Závislost pravděpodobnosti poruchy  $p_f$  na letech provozu mostu (30 až 120 let) a stanovení doby prohlídky konstrukce se zaměřením na vznik únavové trhliny z okraje



Obr. 7: Závislost pravděpodobnosti poruchy  $p_f$  na letech provozu mostu (70 až 120 let) a stanovení doby 1 prohlídky konstrukce se zaměřením na vznik únavové trhliny z povrchu

Pro daný případ řešené ocelové konstrukce pak byla určena doba první prohlídky mostní konstrukce zaměřené na sledování vzniku únavové trhliny z okraje na 54. rok. Při sledování šíření únavové trhliny z okraje pak první prohlídka vychází na 111. rok provozu (vzhledem k pokročilé době první prohlídky již další prohlídky nebyly pomocí podmíněné pravděpodobnosti určovány).

V případě nezaměřitelné trhliny z okraje během první prohlídky mostu je následující prohlídka stanovena na 66. rok provozu konstrukce a při neexistenci trhliny následně s využitím podmíněné pravděpodobnosti na 73. rok provozu mostu. Po tomto roce se již intervaly prohlídek výrazně zkracují (77., 80., 82. a 84. rok provozu mostu) a nevyskytne-li se trhlina v 85. roce provozu konstrukce, dá se předpokládat, že pokud nenastaly změny ve vstupních veličinách (zejména v intenzitě a účinnosti provozního zatížení), střední hodnota počáteční trhliny je menší než předpokládaná nebo se žádná únavová trhlina nevyskytuje.

Při porovnání obou typů únavových trhlin se mj. potvrdila skutečnost, že rychlost šíření únavové trhliny z povrchu je podstatně pomalejší nežli z okraje. Vztáhne-li se tato rychlost k stanoveným dobám prvních prohlídek konstrukce, pak je šíření únavové trhliny z povrchu více než dvakrát pomalejší.

## 6 ZÁVĚR

Příspěvek uvádí teoreticky i prakticky zpracovanou metodiku řešení šíření únavových trhlin z okraje a povrchu u cyklicky namáhaných ocelových konstrukcí a mostů, se zaměřením na jejich největší přípustný rozměr.

Šíření únavových trhlin, s možností jejich předvídání v čase od začátku působení proměnných účinků zatížení, je případem, kdy se výpočet neobejde bez pravděpodobnostních přístupů (např. [12]), neboť stanovení vstupních veličin je poznamenáno značným množstvím nejistot v účincích zatížení i odolnosti konstrukce (např. stochastická odezva na účinky proměnného provozního zatížení formou rozkmitu napětí v místech náchylných na únavové poškození). Nejobtížněji se přitom celosvětově řeší rozměr předpokládané počáteční trhliny.

Výpočetní model řešených úloh je založen na lineární lomové mechanice. S využitím podmíněné pravděpodobnosti pak vede k návrhu pravidelného systému prohlídek konstrukce.



Pro samotné pravděpodobnostní řešení byla využita nově vyvíjená metoda Přímého Optimalizovaného Pravděpodobnostního Výpočtu - POPV, která je vhodná pro celou řadu pravděpodobnostních výpočtů. Příklady aplikace této pravděpodobnostní metody ukazují, že metoda je vhodná nejenom pro úlohy vedoucí k posouzení spolehlivosti, ale také k jiným pravděpodobnostním výpočtům, jako je i předmětný výpočet šíření únavových trhlin. Metoda POPV se jeví jako velice efektivní prostředek pro získání řešení, zatíženého pouze numerickou chybou a chybou danou diskretizací vstupních a výstupních veličin.

## PODĚKOVÁNÍ

Projekt byl realizován za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M0579, v rámci činnosti Centra integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí CIDEAS.

## LITERATURA

- [1] ČSN EN 1990 (ČSN 73 0002), *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Český normalizační institut, Praha, 2004.
- [2] ČSN EN 1993-1-9 (ČSN 73 1401), *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-9: Únava*. Český normalizační institut, Praha, 2006.
- [3] ANDERSON, T.L., *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005. (621 s) ISBN 0-8493-1656-1.
- [4] BUJŇÁK, J., VIČAN, J., ODOBŇÁK, P. *Overenie skutočného pôsobenia spriahnutého ocelobetónového mosta*. Sborník referátů 21. české a slovenské mezinárodní konference Ocelové konstrukce a mosty 2006. Bratislava, 2006. s 303-310 (8 s). ISBN 80-227-2471-8.
- [5] FISCHER, J. W. *Fatigue and Fracture in Steel Bridges*. John Willey and Sons, New York, 1984.
- [6] FISCHER, J. W., KULAK, G. L., SMITH, I. F. C., *A Fatigue Primer for Structural Engineers*. National Steel Bridge Alliance, U.S.A., May 1998. (127 s).
- [7] JANAS, P., KREJSA, M., KREJSA, V., *Software ProbCalc [EXE] - Program System for Probabilistic Reliability Assessment using DOPRO method*. Autorizovaný software, Lite verze 1.2, Ev.č. 003/27-01-2009\SW. VŠB-TU Ostrava, 2008.
- [8] JANAS, P., KREJSA, M., KREJSA, V., *Using the Direct Determined Fully Probabilistic Method for determination of failure*. European Safety and Reliability Conference Esrel 2009, Civil-Comp Press, Praha, 2009. Reliability, Risk and Safety: Theory and Applications. Taylor & Francis Group, London, 2010. s 1467-1474 (8 s). ISBN 978-0-415-55509-8.
- [9] JANAS, P., KREJSA, M., KREJSA, V., *ProbCalc software a publikace věnované metodě POPV*. Webové stránky. [on-line]. <<http://www.fast.vsb.cz/popv>>. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2004-2010.
- [10] JANSSEN, M., ZUIDEMA, J., WANHILL, R.J.H., *Fracture Mechanics*. Second edition, Delft University Press, 2002. (365 s) ISBN 90-407-2221-8.
- [11] KOTEŠ, P., *Vplyv vzniku a šírenia únavovej trhliny na spoľahlivosť ocelových prvkov*. 2005.
- [12] KRÁLÍK, J., *Safety and Reliability of Nuclear Power Buildings in Slovakia. Earthquake - Impact - Explosion*. Slovenská technická univerzita, Bratislava, 2009. (307 s) ISBN 978-80-227-3112-6.
- [13] KREJSA, M., *Využití metody Přímého Optimalizovaného Pravděpodobnostního Výpočtu při posuzování spolehlivosti konstrukcí*. Habilitační práce. VŠB-TU Ostrava, Stavební fakulta, 2010-2011. (328 s, autoreferát 56 s) ISBN 978-80-248-2385-0.
- [14] KREJSA, M., TOMICA, V., *Využití metody PDPV k pravděpodobnostnímu výpočtu šíření únavových trhlin*. Sborník příspěvků mezinárodní konference Modelování v mechanice 2008. VŠB-TU Ostrava, Stavební fakulta, 2008. s 1-2 (2 s) rozšířený abstrakt, (9 s) CD-ROM. ISBN 978-80-248-1705-7.

- [15] KREJSA, M., TOMICA, V., *Probabilistic approach to the propagation of fatigue cracks using Direct Determined Fully Probabilistic Method*. Sborník příspěvků 7. mezinárodní konference Nové trendy v statice a dynamice stavebních konstrukcí. Stavební fakulta STU v Bratislave, 2009. s 155-156 (2 s) abstrakt, (6 s) CD-ROM. ISBN 978-80-227-3170-6.
- [16] KREJSA, M., TOMICA, V., *Pravděpodobnostní přístup k šíření povrchových únavových trhlin v návaznosti na vytvoření plochy oslabení*. Sborník příspěvků mezinárodní konference Modelování v mechanice 2010. VŠB-TU Ostrava, Stavební fakulta, květen 2010. s 3-4 (2 s) rozšířený abstrakt, (13 s) CD-ROM. ISBN 978-80-248-2234-1.
- [17] KREJSA, M., TOMICA, V., *Probabilistic Approach to the Propagation of Fatigue Crack Using Direct Optimized Fully Probabilistic Calculation*. International Conference on Civil Engineering Design and Construction (Eurocodes - Science and Practice), sborník referátů. Varna, Bulharsko, 2010. s 346-353 (8 s). Prof. Marin Drinov Academic Publishing House. ISBN 978-954-322-310-7.
- [18] KREJSA, M., TOMICA, V., *Calculation of Fatigue Crack Propagation Using DOProC Method*. Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, No.1, 2010, Vol.X, Civil Engineering Series, paper #11 (9 s). DOI 10.2478/v10160-010-0011-6. Publisher Versita, Warsaw, ISSN 1213-1962 (Print) 1804-4824 (Online).
- [19] KREJSA, M., TOMICA, V., *Šíření únavových trhlin z okraje a povrchu s ohledem na překročení meze pevnosti*. Sborník příspěvků mezinárodní konference Modelování v mechanice 2011. VŠB-TU Ostrava, Stavební fakulta, 2. až 3. únor 2011. s 39-40 (2 s) rozšířený abstrakt, (34 s) plné znění na CD-ROM. ISBN 978-80-248-2384-3.
- [20] LAJČÁKOVÁ, G., *Dynamic effect of vehicle during its passing over retarder*. Selected Scientific Papers, Journal of Civil Engineering, Vol. 5, Issue 2, 2010. s 45-52 (8 s) ISSN 1336-9024.
- [21] SANFORD, R. J., *Principles of Fracture Mechanics*. Pearson Education, Inc., U.S.A., 2003. (404 s) ISBN 0-13-092992-1.
- [22] TOMICA, V., GOCÁL, J., KOTEŠ, P., *Acceptable Size of Fatigue Crack on Tension Flange of Steel Bridges*. Sborník referátů 21. české a slovenské mezinárodní konference Ocelové konstrukce a mosty 2006. Bratislava, 2006. s 91-96 (6 s). ISBN 80-227-2471-8.
- [23] TOMICA, V., KREJSA, M., *Optimal Safety Level of Acceptable Fatigue Crack*. 5th International Probabilistic Workshop, Ghent, Belgie, 2007. (12 s) ISBN 978-3-00-022030-2.
- [24] TOMICA, V., KREJSA, M., *Únavová odolnost v metodě přípustných poškození*. Sborník referátů 22. české a slovenské mezinárodní konference Ocelové konstrukce a mosty 2009. Brněnské výstaviště, 2009. CERM, s.r.o., 2009. s 327-332 (6 s). ISBN 978-80-7204-635-5.
- [25] TOMICA, V., KREJSA, M., GOCÁL, J., *Přípustná únavová trhlinka - teorie a aplikace*. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, číslo 1, rok 2008, ročník VIII, řada stavební. VŠB-TU Ostrava, Stavební fakulta, 2008. Články č. 9 a 10. s 103-124 (20 s). ISBN 978-80-248-1883-2, ISSN 1213-1962.

#### **Oponentní posudek vypracoval:**

Prof. Ing. Jiří Šejnoha, DrSc., Fakulta stavební, ČVUT, Praha.

Prof. Ing. Zdeněk Kala, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, VUT v Brně.